

姿控发动机减压阀出口压力 偏差计算方法研究

李晓瑾, 常小庆

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 减压阀出口压力偏差对姿控发动机的性能有较大影响, 通常所采用的小偏差分析方法因不能有效分离非调整工况下工况偏离和其它干扰因素对发动机性能的相互影响, 所计算的减压阀出口压力范围误差较大。本文提出了将工作工况作为影响发动机性能的一项干扰因素, 基于姿控发动机系统静态模型, 应用系统压力平衡原理计算发动机各工况下干扰因素影响系数的方法, 根据计算结果采用随机误差分析方法确定了减压阀的出口压力偏差范围, 所得结果符合发动机性能要求。

关键词: 姿控发动机; 减压阀; 出口压力; 干扰因素

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2008) 06-0019-05

Research on outlet pressure deviation calculation of pressure reducing valve for attitude control engine

Li Xiaojin, Chang Xiaoqing

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Outlet pressure deviation of a pressure reducing valve is an important factor affecting the performance of an attitude control engine. It is not proper to calculate the outlet pressure by the small perturbation analysis method because this method doesn't calculate the performance deviation under non-rated operation condition effectively. This paper presents a new method in performance calculation of the attitude control engine by employing the system pressure equilibrium theory based on the system static model. Simulation calculation is carried out in multi-steps. Based on simulation results, this paper adopts the stochastic error analysis method to calculate the outlet pressure of the reducer and the results meet the engine performance.

Key words: attitude control engine; pressure reducing valve; outlet pressure; performance influence factor

收稿日期: 2008-07-09; 修回日期: 2008-09-23。

作者简介: 李晓瑾 (1975—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机系统技术。

0 引言

减压阀作为挤压式液体火箭发动机（以下简称发动机）系统的一个关键组件，对发动机的性能影响较大，并且与其它影响发动机系统性能的干扰因素之间形成较强的耦合关系。目前在发动机实际工程研制领域，其它干扰因素结合工艺水平和研制经验可以给定比较合理的范围，在此基础上，如何确定合理的减压阀出口压力偏差范围成为设计的关键。减压阀出口压力偏差要求偏严，则在当前工艺水平和工艺条件下，产品合格率低；减压阀出口压力偏差要求偏松，则难以保证发动机性能。因此，结合其它影响发动机性能的干扰因素，合理确定减压阀出口压力偏差是一个急需解决的问题。

由于姿控发动机减压阀出口压力受发动机工作工况的影响，在一定范围内变化，且不同工作工况下减压阀出口压力不相同。本文以某双组元姿控发动机为例，根据姿控发动机的工作特点，结合试验数据，进行分析、比较，认为一直沿用的小偏差方法不能有效分离非调整工况下由于工况偏离和其它干扰因素对发动机性能的相互影响，导致计算结果不准确。因此，为了在系统设计时能够较准确地给出减压阀的出口压力偏差，通过建立发动机系统状态方程模型，将工作工况变化作为一项干扰因素，提出了一种适用于发动机多工作工况的影响系数计算方法，并根据计算结果采用随机误差计算给出了减压阀的出口压力偏差。

1 减压阀出口压力计算方法分析

根据姿控发动机的工作特点和工作方式，结合发动机其它影响性能的干扰因素，针对减压阀出口压力偏差的计算方法进行了分析。

1.1 极限偏差分析方法

极限偏差分析方法是在发动机其它干扰因素同时达到极限偏差时（推进剂温度、推力室喉部直径、燃烧效率等），根据线性叠加原理，计算

各工况性能满足要求的前提下，减压阀出口压力允许的最大范围。由于发动机各干扰因素对性能的影响系数并非皆为纯递减（增）关系，且各干扰因素同时达到极限偏差的可能性极小，所以，此方法计算的减压阀出口压力偏差要求偏严。

1.2 试车数据统计方法

试车数据统计方法是根据地面整机试车数据，对各次整机试车中所测的相同工作工况下的发动机实际性能参数（以燃烧室压力表征）和减压阀出口压力数据进行统计分析，经过拟合得到减压阀出口压力和发动机性能参数之间的函数关系，再通过发动机性能参数的最大偏差计算减压阀出口压力范围。由于发动机性能参数同时受多个干扰因素的影响，该方法中不能分离各干扰因素的相互影响作用，故所统计的同工况下减压阀出口压力和燃烧室压力之间没有规律。因此，无法通过试车数据统计方法确定减压阀出口压力偏差。

1.3 随机误差分析方法

由于影响发动机性能的各干扰因素及其偏差是随机变化的，结合工程实际，提出应用随机误差方法计算减压阀出口压力。公式（1）给出了随机误差计算公式。

$$\delta Y = \sqrt{(a_1 \cdot \delta x_1)^2 + (a_2 \cdot \delta x_2)^2 + \dots + (a_n \cdot \delta x_n)^2} \quad (1)$$

式中， δY 表示燃烧室的压力偏差； a_1, a_2, \dots, a_n 表示各干扰因素对燃烧室压力的影响系数； $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$ 表示各干扰因素偏差。

随机误差分析思想是在发动机性能偏差满足要求的前提下，计算减压阀出口压力偏差范围。应用该方法时首先需要确定发动机的干扰因素，计算干扰因素对发动机性能的影响系数。

2 影响发动机性能的干扰因素分析

以某恒压挤压式双组元姿控发动机为研究对象，该发动机是一个复杂的机械-流体-热力系统，其性能受诸如结构参数、性能参数和外部干扰等众多因素影响，并且这些因素之间具有较强的耦合作用，根据工程研制经验，通常发动机考

虑以下几个影响性能 (以燃烧室压力表征) 的干扰因素: 推进剂温度、推力室喉部直径、燃烧效率、流阻系数及减压阀出口压力。

对于姿控发动机而言, 除上述干扰因素之外, 对发动机性能影响很大一部分还包括工作工况的影响。即其它干扰因素均处于额定值时, 当发动机工作工况偏离额定工况时 (调整工况), 发动机的性能也发生变化。所以, 本文计算时, 与以往发动机不同, 将工作工况的变化也作为一个干扰因素。

表 1 给出了所考虑的干扰因素的绝对偏差。

表 1 性能影响因子的绝对偏差

Tab.1 Absolute deviations of performance influence factors

性能影响因素	A 推力室	B 推力室	C 推力室
δt (温度, $^{\circ}\text{C}$)	-0.25~+1.0	-0.25~+1.0	-0.25~+1.0
$\delta \eta_c$ (燃烧效率)	± 0.0173	-0.0421~ +0.0573	± 0.0568
δd_t (喉部直径, mm)	± 0.0068	± 0.0069	± 0.0212
δC_{ab} (氧化剂液路流阻系数)	± 0.01	± 0.01	± 0.01
δC_{af} (燃料液路流阻系数)	± 0.01	± 0.01	± 0.01
δGk (工作工况)	1.0	1.0	1.0

3 干扰因素影响系数计算

3.1 小偏差分析方法计算干扰因素影响系数的局限性

在确定发动机干扰因素之后, 通常采用小偏差分析方法计算发动机干扰因素对室压的影响系数。即以发动机的额定点为基础, 通过偏微分求导计算。由于一般发动机的稳态额定点是不变的, 小偏差计算中额定点容易确定, 计算的干扰因素系数比较准确。但对于姿控发动机而言, 发动机的推力品种和数量较多, 如本文研究发动机的推力室品种和数量为 4 台 M、4 台 N 和 8 台 L。根据功能需求, 推力室按照不同的组合方式进行工作, 使得发动机的工作工况多样。应用小偏差

分析方法计算干扰因素对室压的影响系数时, 存在以下问题:

(1) 无法考虑工况变化对发动机性能的影响。

(2) 在非额定工况下, 如 $4 \times M + 4 \times L + 2 \times N$ 工况, 平衡后各推力室的额定值已经偏离了原调整点, 但小偏差分析计算中仍采用 $4 \times M + 4 \times L$ (额定工况) 下的额定值计算, 也影响计算结果的准确性。

(3) 在发动机中, 如果推力室的装配位置不同, 即使相同类型的推力室, 其液路管路的流阻特性就不同, 在这种情况下, 小偏差分析计算同种推力室不同安装位置对性能产生的影响时比较复杂。

综上所述, 为了准确分析发动机在各种工作工况下的干扰因素影响系数, 提出结合发动机的总装结构布局, 根据发动机系统压力平衡原理, 建立发动机系统静态模型, 通过数值仿真, 计算发动机干扰因素影响系数的计算方法。

3.2 发动机系统静态模型及干扰因素参数计算

在建立某姿控发动机系统静态模型的统一型方程前, 首先结合该发动机系统结构, 建立气路管路流阻特性模型、液路总管路流阻特性模型、液路分支流阻特性模型 (包括分支管路、限流部件、控制阀门、喷注器) 和各燃烧室压力方程, 然后根据系统压力平衡原理, 建立每台推力室的氧化剂和燃料路的压力平衡方程, 在发动机的系统静态模型中引入推进剂密度与温度关系模型、特征速度与余氧系数关系模型, 从而使所建立的发动机系统静态模型更为准确地模拟发动机的实际情况。下面给出各方程的具体形式:

系统压力平衡方程

$$p_{\text{erk}} = \Delta p_{\text{gjk}} + \Delta p_{\text{ijk}} + \sum \Delta p_{\text{ijk}} + p_{\text{ck}} \quad (2)$$

气路管路流阻特性

$$\Delta p_{\text{gjk}} = a_j + b_j \left(\sum q_{ijk} / \rho_j \right)^2 \quad (3)$$

液路总管路流阻特性

$$\Delta p_{\text{ijk}} = a_{jk} + b_{jk} \times \sum q_{ijk} / \sqrt{\rho_j} + c_{jk} \left(\sum q_{ijk} \right)^2 / \rho_j \quad (4)$$

液路分支流阻特性

$$\Delta p_{\text{ijk}} = c_{ijk} q_{ijk}^2 / \rho_j \quad (5)$$

特征速度与余氧系数关系模型

$$\dot{C}_{thk} = a_{1k} + b_{1k} \alpha_k + c_{1k} \alpha_k^2 \quad (6)$$

推进剂密度与温度关系模型

$$\rho_j = a_{2j} + b_{2j} t_j + c_{2j} t_j^2 \quad (7)$$

燃烧室压力方程

$$p_{ck} = \frac{4q_k \dot{C}_{thk} \eta_{ck}}{\pi d_{thk}^2} \quad (8)$$

式中, p 为压力; \dot{C}_{thk} 为特征速度; η 为燃烧效率; α 为余氧系数; ρ 为推进剂密度; t 为推进剂温度; a, b, c 分别为关系式中的拟合系数; 下标 g 表示气路, l 表示液路, C 表示燃烧室, j 表示推进剂种类 (氧化剂或燃料), i 为系统中减压阀后液路分支零、部 (组) 件编号, k 为实际工作的推力室编号。

以工作工况为控制参数, 将上述方程用统一形式表述, 则可建立发动机系统静态模型, 如式 (9) 所示

$$\begin{cases} f_1(X, A, B, C) = 0 \\ f_2(X, A, B, C) = 0 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ f_{n-1}(X, A, B, C) = 0 \\ f_n(X, A, B, C) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, X 为各台推力室的推进剂流量参数; A 为发动机工作状态参数, 代表工作工况、推进剂温度等; B 为发动机流阻特性参数, 代表液路流阻系数; C 为推力室特征参数, 代表推力室喉部直径、燃烧效率、特征速度系数等。

该模型中所包含分式的数量由工作工况确定, 如 $4 \times M + 4 \times L + 2 \times N$ 工况 (工作的推力装置序号 $4 \times M$ 为 1、2、3、4, $4 \times L$ 为 5、6、13、15, $2 \times N$ 为 9、10), 则该模型为对应的 10 台推力装置的 20 个平衡方程组成, 若工况为 $1 \times L$ (工作的推力装置序号 7), 则该模型由对应的 1 台 7# 推力装置的 2 个平衡方程组成。

干扰因素影响系数计算时, 首先计算工况偏离调整工况时引起的性能偏差 (其它干扰因素均在额定工况可认为偏差系数为零); 然后, 可分别改

变发动机各干扰因素等参数, 再计算此工况下, 各干扰因素变化对性能的影响系数; 最后, 用此工况下各干扰因素的影响系数减去工作工况偏离引起的影响系数即为该干扰因素单独对性能的影响系数。

本文采用可变尺度的 Newton 迭代法求解式 (9) 所表述的发动机静态模型。

由于该模型中液路分支流阻特性是根据系统中每台推力装置对应的实际流阻特性建立, 且根据工作工况建立的系统静态模型不但能够计算工况变化对性能的影响系数, 而且弥补了小偏差计算中非调整工况下干扰因素影响系数仍采用调整工况的额定点值计算的不足, 所以计算结果比较准确。

4 减压阀出口压力偏差计算结果

根据上述分析过程, 计算出各工况下的影响系数, 并结合各干扰因素相对偏差范围, 采用随机误差计算方法, 计算出发动机不同工作工况下的减压阀出口压力偏差。分别以 $4 \times M + 4 \times L + 2 \times N$ 、 $4 \times M + 4 \times L$ 、 $1 \times L + 2 \times N$ 、 $2 \times N$ 、 $3 \times L$ 、 $1 \times L$ 工况为例, 计算得到的各工况下减压阀出口压力偏差如表 2 所示, 结合减压阀特性给定的出口压力偏差见表 3。

表 2 各工况下减压阀出口压力范围

Tab.2 Outlet pressure range of the pressure reducing valve at different conditions

序号	工 况	减压阀出口 压力范围/MPa
1	$4 \times M + 4 \times L + 2 \times N$	1.67~1.87
2	$4 \times M + 4 \times L$	1.56~2.02
3	$1 \times L + 2 \times N$	1.62~2.04
4	$2 \times N$	1.61~2.05
5	$3 \times L$	1.62~2.02
6	$1 \times L$	1.67~1.98

(下转第 44 页)

性大为提高。

4 结论

用 Labview 开发控制程序在 RT 实时系统下运行,通过局域网进行上、下位机之间联系的这种程序开发模式能够将硬件系统的实时性发挥到最大,尤其适用于高精度要求的测控系统中。液氧/煤油台容器储箱压力控制软件自投入使用以来经历了冷调及 40 余次热试车均运行正常,满足试车的要求,证明了该软件系统稳定可靠。Labview 是专门用于开发测控软件的图形化开发平台,拥有强大的测控软件开发包,在开发速度上要较文本模式开发环境(C 语言等)有较大的优势;同时 RT 系统使测控软件在实时性和可靠

参考文献:

[1] 张海藩. 软件工程导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[2] Jean J Labrosse. 嵌入式实时操作系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
[3] 王平. 计算机控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
[4] 杨乐平. Labview 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[5] National Instrument. Rea-time OS User's Manual[M]. 2004.
[6] 李伟民. 液氧/煤油发动机试验系统[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 50-56.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 22 页)

表 3 满足系统性能的减压阀出口压力范围
Tab.3 Qualified pressure range of the pressure reducing valve

出口流量/L·s ⁻¹	减压阀出口压力范围/MPa(绝)
4×M+4×L< Q ≤4×M+4×L+2×N	1.67~1.87
2×N≤ Q ≤4×M+4×L	1.62~2.02
1×L≤ Q <2×N	1.67~1.98

根据表 3 确定的减压阀出口压力范围,通过生产和试验,表明减压阀的出口压力范围确定合理,既能保证产品较高的合格率,又能保证姿控发动机各种工作工况下性能满足要求。

5 结论

比较分析了极限偏差分析方法、试车数据统计方法、随机误差分析方法确定减压阀出口压力范围的适用性。提出了将工作工况变化作为一项

影响性能的干扰因素,通过建立以工作工况控制的发动机全系统静态模型,较准确地计算了各工作工况下干扰因素对性能的影响系数。最后,在前述分析计算的基础上,应用随机误差分析方法计算求解,得到比较合理的姿控发动机减压阀出口压力偏差范围,从而解决了姿控发动机设计中减压阀出口压力确定的实际问题。该方法也可用于单组元、双组元和双模式轨姿控发动机设计中其它参数偏差的计算。

参考文献:

[1] 刘红军. 补燃循环发动机静态特性与动态响应特性研究[D]. 航天工业总公司第十一研究所, 1998.
[2] 尤裕荣. 逆向卸荷式气体减压阀静态特性分析[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 15-21.
[3] 樊忠泽, 黄敏超, 余勇, 等. 空间推进系统工作过程的模块化建模[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 29-33.

(编辑: 王建喜)